

УДК 621.311.001

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый

Томский политехнический университет

E-mail: Svech@tpu.ru

Приведено обоснование необходимости существенного повышения полноты и достоверности моделирования процессов в энергосистемах. Представлены результаты синтеза универсальной математической модели одного из основных элементов энергосистем – силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Требуемое качество воспроизведения процессов подтверждено опытом использования разработанной модели в составе всережимных многопроцессорных моделирующих комплексов реального времени гибридного типа. Приведены примеры, иллюстрирующие качество моделирования процессов.

Согласно статистике [1, 2] около 50 % тяжелых аварий в электроэнергетических системах (ЭЭС), в том числе в ЭЭС, происходит из-за неправильных действий диспетчерского персонала, релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики, главной причиной которых служит использование при проектировании, пусконаладках и эксплуатации недостаточно полной и достоверной информации о возможных процессах, особенно аварийных, в ЭЭС.

Специфика ЭЭС практически исключает возможность получения этой информации натурным путем, а чрезвычайная сложность современных ЭЭС значительно ограничивает применимость их физического моделирования. В результате основным способом получения информации о всевозможных нормальных и аварийных процессах в ЭЭС оказывается математическое моделирование, возможности которого зависят от наличия:

- достаточно точных математических моделей для всех видов и типов оборудования и их использования;
- средств, способных надежно и эффективно решать образуемые этими моделями системы уравнений ЭЭС.

Указанная постоянно высокая составляющая аварийности в ЭЭС объективно свидетельствует о том, что существующие реализации этих факторов не обеспечивают необходимой для ее существенного снижения полноты и достоверности математического моделирования и в частности нужной для эффективного диспетчерского управления его оперативности.

Подробный анализ этих факторов и их взаимосвязи приведены в [3–8], из которого следует насущная необходимость и актуальность дальнейшего развития обоих этих факторов. Очевидно также, что логически первоочередным при этом становится первый из них.

Достигнутый к настоящему времени уровень математического описания процессов в различных элементах энергетического оборудования позволяет ставить и решать задачи обоснованного синтеза математических моделей для всех видов и типов

используемого в ЭЭС оборудования, достаточно полно и достоверно описывающих без декомпозиции весь спектр процессов.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы, являясь неотъемлемыми и значимыми элементами преобразования и распределения электроэнергии, оказывают существенное влияние на процессы в ЭЭС в целом. Поэтому для достижения необходимой полноты и достоверности воспроизведения процессов в ЭЭС их математическая модель должна быть достаточно высокоточной и учитывать технологически и конструктивно необходимое разнообразие применяемых в ЭЭС трансформаторов и автотрансформаторов: с общим и раздельными для обмоток каждой фазы магнитопроводами; с различным количеством обмоток (2–4) в каждой фазе, в том числе расщепленных на 2–4 электрически независимых цепи, а также три применяемые схемы соединения обмоток фаз ( $Y_0$ ,  $Y$ ,  $\Delta$ ) на каждой из ступеней напряжения и их возможные сочетания. Перечисленные типы трансформаторов и автотрансформаторов можно объединить виртуальным адаптируемым пятиобмоточным трансформатором и принять его в качестве прототипа для синтеза универсальной для всех указанных типов математической модели.

При формировании системы уравнений, описывающей электромагнитные процессы в этом трансформаторе, приняты во внимание конструктивные исполнения обмоток и магнитопроводов, в том числе бронестержневых, которые, в частности, позволяют без существенного ущерба для точности воспроизведения процессов пренебречь электромагнитным взаимовлиянием обмоток разных фаз и учитывать взаимодействие обмоток каждой фазы только с собственными магнитными потоками рассеивания и основным магнитным потоком своей фазы, а также возможность насыщения магнитопровода для этого потока [9]. Такое представление позволяет трёхфазные групповые и собственно трёхфазные трансформаторы и автотрансформаторы также отображать обозначенной универсальной математической моделью. К тому же появляется возможность вводить, если необходимо, асимметрию фаз.

Согласно обозначенному подходу в моделировании трансформаторов и автотрансформаторов их универсальная математическая модель должна объединять в себе системы уравнений для трёх фаз каждой из пяти обмоток. Применяя для компактного представления модели соответствующую индексацию фаз и номеров обмоток, данную модель можно описать системой уравнений:

- 1) магнитосвязанных потоком фазы контуров обмоток, вида

$$\omega_{i\xi} \frac{d\Phi_{\xi}}{dt} + L_{i\xi} \frac{di_{i\xi}}{dt} + r_{i\xi} i_{i\xi} - u_{i\xi} = 0,$$

где  $i=1,2,\dots,5$  – номер обмотки, а  $\xi=A,B,C$  – индекс фазы, с учетом которых:  $\omega_{i\xi}$  – число витков;  $\Phi_{\xi}$  – мгновенное значение основного магнитного потока;  $L_{i\xi}$  – индуктивность рассеивания;  $i_{i\xi}$  – мгновенное значение тока;  $r_{i\xi}$  – активное сопротивление;  $u_{i\xi}$  – мгновенное значение напряжения;

- 2) баланса магнитодвижущих сил для каждой фазы

$$\sum_{i=1}^5 i_{i\xi} \omega_{i\xi} = F_{\mu\xi},$$

где  $F_{\mu\xi}$  – намагничивающая сила электромагнитной системы фазы пятиобмоточного трансформатора, определяемая с учётом возможного насыщения стали для  $\Phi_{\xi}$  аппроксимирующим выражением [10]  $F_{\mu\xi} = K_{\mu} \Phi_{\xi}^{\rho}$ , в котором  $K_{\mu}$  – коэффициент размерности, реализуемый при переходе к относительным единицам измерения. Аппроксимация кривой намагничивания задается степенной зависимостью с нечётными или дробными значениями показателя  $\rho$  в диапазоне 3...5, причем дробные значения используются для особо точной аппроксимации;

- 3) формирования  $u_{i\xi}$ , в зависимости от схемы соединения обмоток  $\omega_{iA}$ ,  $\omega_{iB}$ ,  $\omega_{iC}$ :

$$u_{iA} = (u_{Ai} - u_{Bi}) / \sqrt{3}; \quad u_{iB} = (u_{Bi} - u_{Ci}) / \sqrt{3};$$

$$u_{iC} = (u_{Ci} - u_{Ai}) / \sqrt{3} \quad \text{для } \Delta;$$

$$u_{iA} = u_{Ai}; \quad u_{iB} = u_{Bi}; \quad u_{iC} = u_{Ci} \quad \text{для } Y \text{ и } Y_0,$$

где  $u_{Ai}$ ,  $u_{Bi}$ ,  $u_{Ci}$  – мгновенные значения соответствующих фазных напряжений.

Дополнительно, для исключения токов нулевой последовательности применительно к схеме соединения обмоток  $Y$  и для обеспечения различного рода априори нерегламентированных функциональных возможностей, связанных с нулевой последовательностью, в рассматриваемую систему включены уравнения:

$$i_{Ai} = i_{iA} - K_{0i} \cdot i_{i0}; \quad i_{Bi} = i_{iB} - K_{0i} \cdot i_{i0};$$

$$i_{Ci} = i_{iC} - K_{0i} \cdot i_{i0}; \quad i_{i0} = \frac{1}{3}(i_{iA} + i_{iB} + i_{iC}),$$

где:  $i_{Ai}$ ,  $i_{Bi}$ ,  $i_{Ci}$  – мгновенные значения соответствующих фазных токов;  $K_{0i}$  – регулируемый коэффициент, промежуточные (между крайними) значения которого позволяют при необходимости имитировать специфические условия протекания тока нулевой последовательности.

Для воспроизведения кривой намагничивания  $F_{\mu\xi} = f(\Phi_{\xi})$  посредством степенного аппроксимирующего выражения может быть использовано неявное уравнение [11]

$$F_{\mu\xi} = \Phi_{\xi}^2 - \alpha \Phi_{\xi} (\Phi_{\xi} - F_{\mu\xi}) \approx \Phi_{\xi}^{\rho},$$

обеспечивающее более гибкую и эффективную аппроксимацию за счет варьирования коэффициента  $\alpha$ .

Следует заметить, что поскольку как минимум одна из обмоток, например,  $\omega_1$  любого трансформатора обязательно является возбуждающей (питающей), а ещё одна из обмоток, например,  $\omega_3$  оказывается пассивной (принимающей), то знаки в уравнениях для контуров и магнитодвижущих сил этих обмоток становятся определёнными, тогда как знаки в уравнениях остальных обмоток зависят от конкретного предназначения последних.

Из приведенной системы уравнений видно, что путем задания и вариации параметров математической модели (коэффициентов в уравнениях) можно моделировать любой тип силового трансформатора и автотрансформатора.

Рассмотренная математическая модель надежно и всесторонне испытана в лабораторных условиях на классических опытах холостого хода, короткого замыкания и номинальной нагрузки, а также, что наиболее важно и убедительно, на практике в составе всережимных многопроцессорных моделирующих комплексов реального времени гибридного типа, разработанных и изготовленных для учебных и научно-исследовательских целей подразделений Электротехнического института Томского политехнического университета и для ОАО «Тюмень-энерго». Гибридный моделирующий комплекс Тюменской энергосистемы (ГМК ТЭ) прошел длительную и успешную опытную эксплуатацию в центральной диспетчерской службе ОАО «Тюмень-энерго». На базе рассмотренной модели в ГМК ТЭ воспроизведены все блочные и сетевые трансформаторы и автотрансформаторы. Результатами эксплуатации полностью и наглядно подтверждено значительное повышение качества и достоверности моделирования всевозможных нормальных и аварийных процессов в ТЭ, полученное за счет применения намного более точных, по сравнению с обычно используемыми, математических моделей для всех элементов ЭЭС и, в частности, синтезированной для трансформаторов и автотрансформаторов. Отдельные фрагменты из архива многочисленных результатов опытной эксплуатации ГМК ТЭ, иллюстрирующие качество воспроизведения аварийных процессов в ЭЭС, на которые существенное влияние оказывают полнота и достоверность моделирования процессов непосредственно в трансформаторах и автотрансформаторах, приведены на рис. 1–4.

Представленные на рис. 1–4 осциллограммы токов и напряжений отображают наиболее частые, гарантированно узнаваемые и оцениваемые специалистами симметричные и несимметричные аварийные процессы в ЭСС.

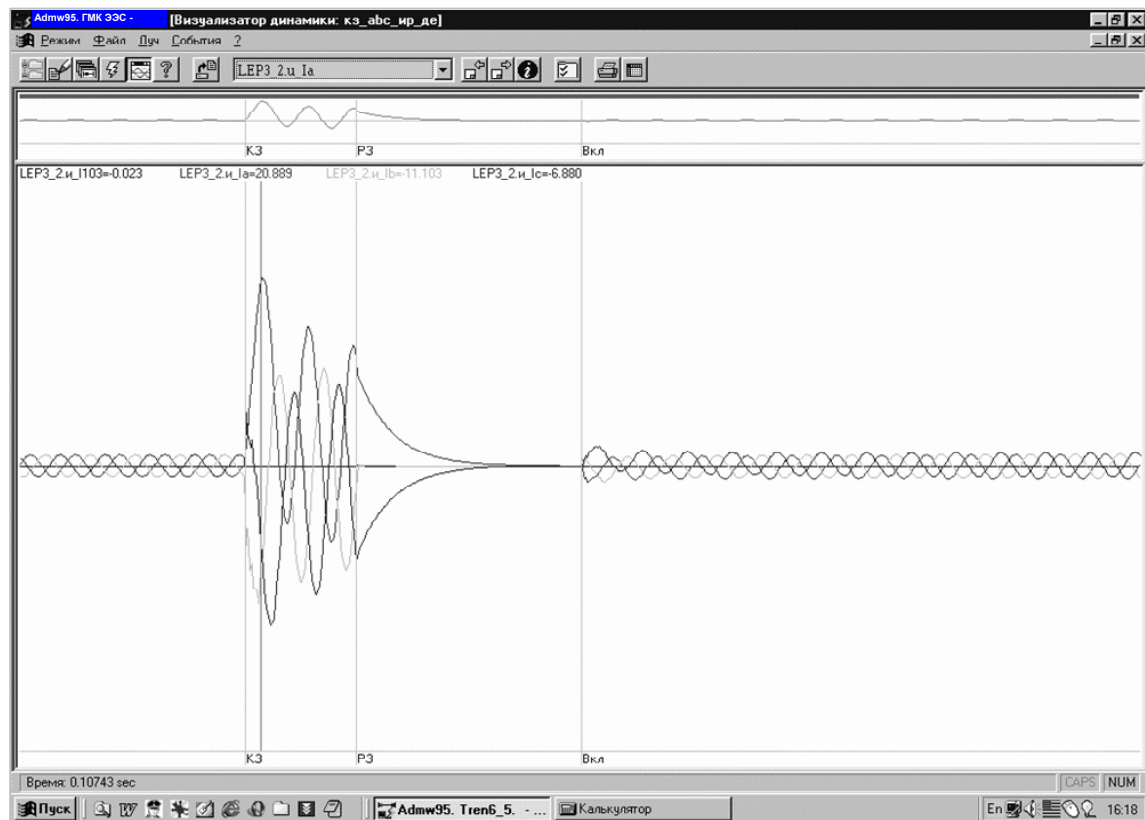


Рис. 1. Фазные токи при моделировании трехфазного короткого замыкания

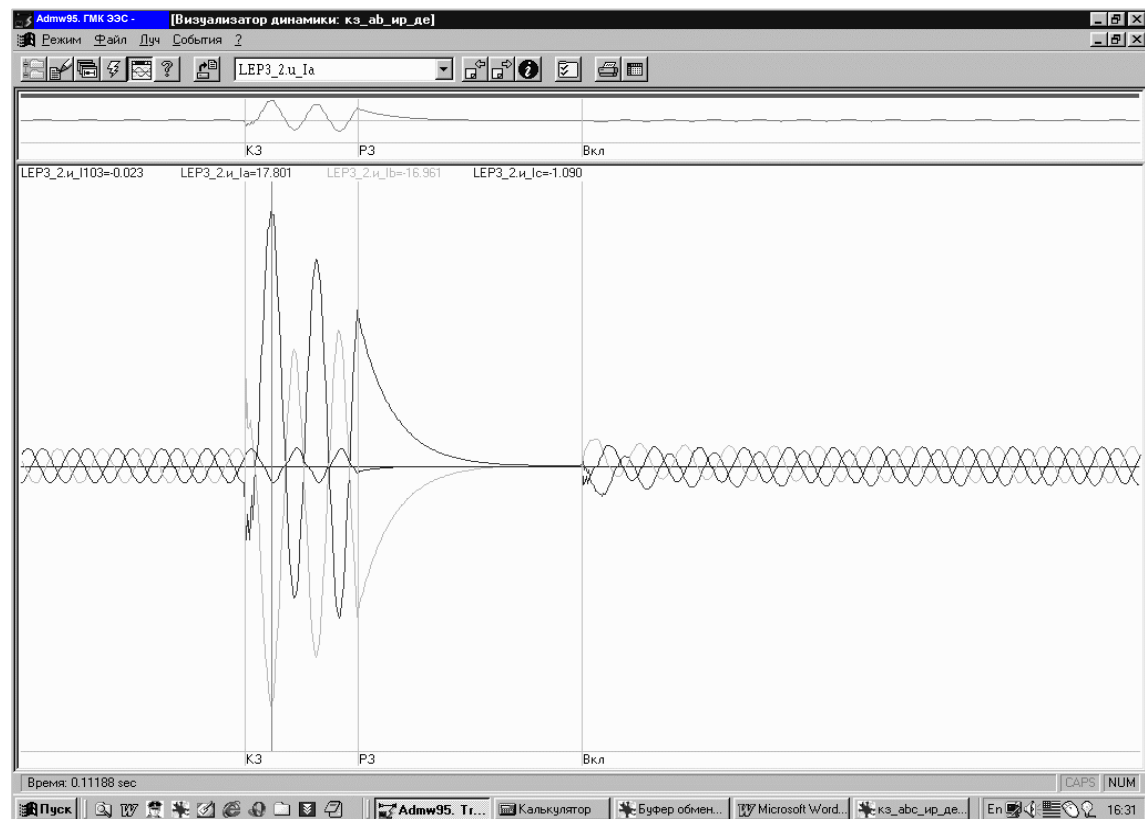


Рис. 2. Фазные токи и ток нулевой последовательности при межфазном коротком замыкании двух фаз

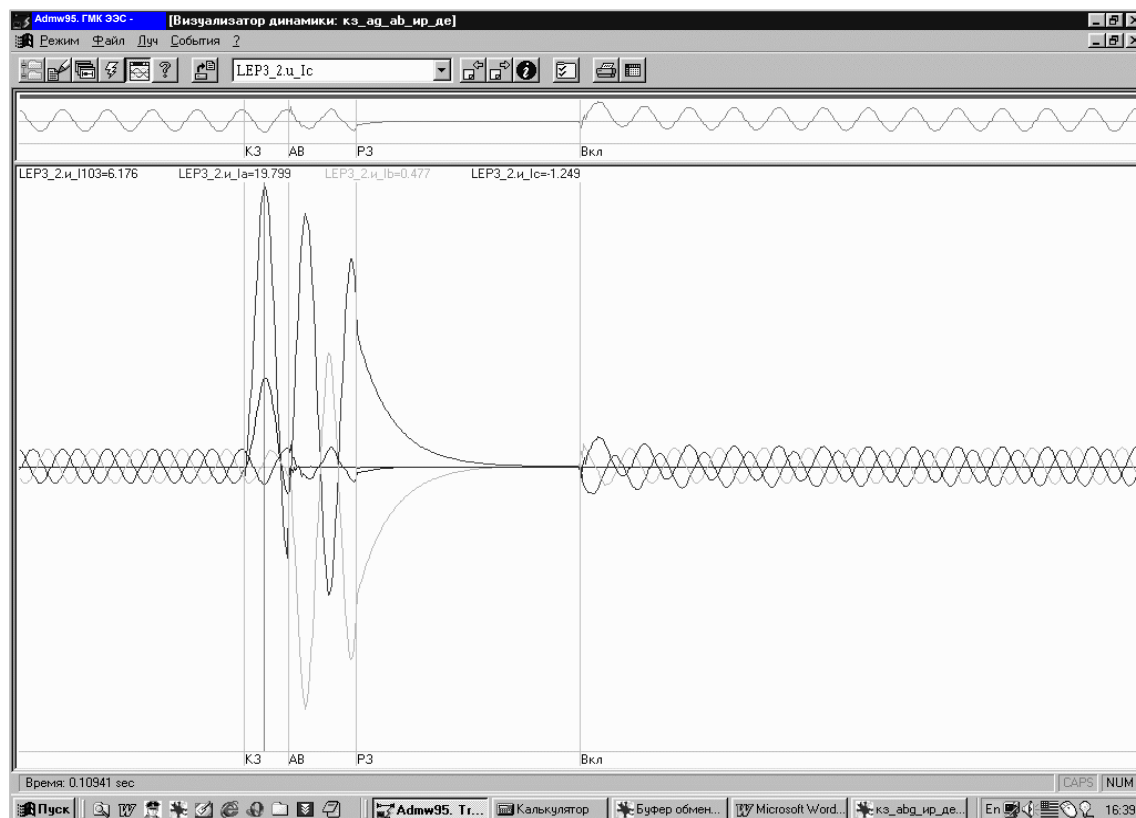


Рис. 3. Фазные токи и ток нулевой последовательности при однофазном и последующем двухфазном коротких замыканиях

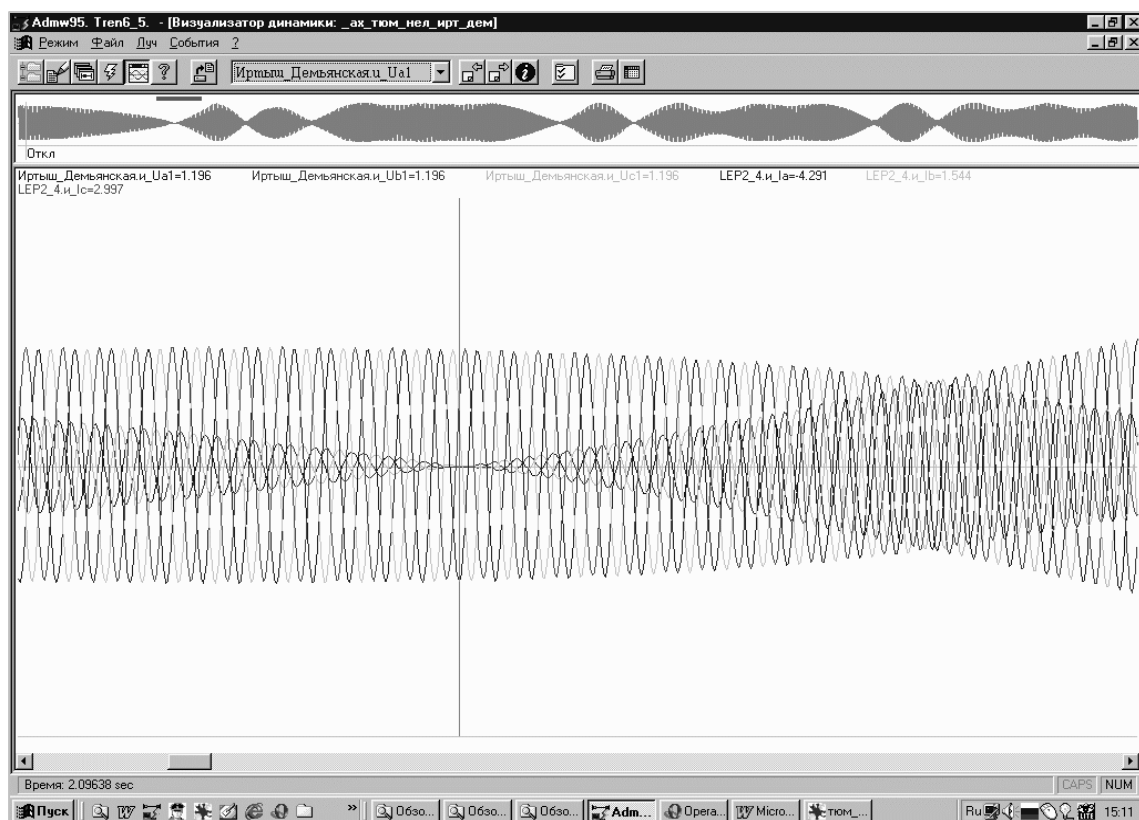


Рис. 4. Фазные токи и напряжения при моделировании асинхронного режима в ЭЭС

Дополнительно можно отметить, что на основе результатов опытной эксплуатации ранее созданного ГМК ТЭ и на базе новейших достижений интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и программно-информационных технологий разработан и сдан проект модернизированного всережимного моделирующего комплекса реального времени гибридного типа для ОАО «ФСК ЕЭС», в котором для моделирования трансформаторов и автотрансформаторов использована рассмотренная универсальная математическая модель.

#### Выводы

1. Синтезирована универсальная математическая модель одного из основных элементов энерго-

систем — силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Требуемое качество воспроизведения процессов подтверждено опытом использования разработанной модели в составе всережимных многопроцессорных моделирующих комплексов реального времени гибридного типа.

2. Рассмотренная универсальная математическая модель позволяет без декомпозиции более точно воспроизводить весь спектр процессов в любом из используемых в ЭЭС силовых трансформаторах и автотрансформаторах, ее применение при моделировании процессов в ЭЭС позволяет существенно повысить достоверность расчетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скопинцев В.А., Морошкин Ю.В. Анализ и прогноз аварийности в электроэнергетических системах // Электричество. — 1997. — № 11. — С. 2–8.
2. Управление мощными энергообъединениями / Под ред. С.А. Савалова. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 256 с.
3. Хеминг Р.В. Численные методы: Пер. с англ. / Под ред. Р.С. Гутера. — М.: Наука, 1968. — 400 с.
4. Бабушка И., Витасек Э., Прагер М. Численные процессы решения дифференциальных уравнений: Пер. с англ. / Под ред. Г.И. Марчука. — М.: Мир, 1969. — 368 с.
5. Холл Дж., Уатт Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений: Пер. с англ. / Под ред. А.Д. Горбунова. — М.: Мир, 1979. — 312 с.
6. Погосян Т.А. Погрешность расчетов электромеханических переходных процессов в электрических системах // Электричество. — 1984. — № 3. — С. 54–56.
7. Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). — М.: Высшая школа, 2001. — 382 с.
8. Gusev A.S., Svechkarev S.V., Plodisty I.L. The problem of power system modeling, the concept hybrid solution // The 10<sup>th</sup> IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symp. in Large Scale Systems: Theory and Applications (LSS 2004). — Japan, Osaka, Osaka International Convention Center, July 26-28, 2004. — V. 1. — P. 440–445.
9. Лейтес Л.В., Пинцов А.М. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. — М.: Энергия, 1974. — 192 с.
10. Бернас С., Цек З. Математические модели элементов электроэнергетических систем. — М.: Энергоиздат, 1982. — 312 с.
11. Справочник по нелинейным схемам: Пер. с англ. / Под ред. Д. Шейнголда. — М.: Мир, 1977. — 523 с.

*Поступила 26.12.2005 г.*